

철도 차량용 IPMSM의 전속도 영역 센서리스 제어를 위한 구동 재개 알고리즘

길도영, 김준석, 이준희*, 이준석
단국대학교, 한국철도기술연구원* (KRRI)

Restart Algorithm for Sensorless Control in Full Speed of IPMSM for Railway Vehicles

Do-Young Gil, Joon-Seok Kim, June-Hee Lee*, June-Seok Lee
Dankook University, Korea Railroad Research Institute* (KRRI)

ABSTRACT

본 논문은 철도 차량용 영구자석 동기전동기의 전속도 영역 센서리스 제어를 위한 구동 재개 알고리즘을 제안한다. 전동기가 회전하는 상황에서 제어기 또는 인버터의 동작이 중단되는 등의 비상 상황의 경우 원활한 구동 재개를 위해서는 속도와 위치의 정확한 추정이 요구된다. 본 논문은 영전압 벡터를 이용한 구동 재개 방식에서 추정 성능에 영향을 미치는 요인을 분석하고 단락전류 크기를 기준으로 영전압 벡터 인가 시간을 결정하는 방법을 제안한다. 단락전류의 크기는 역기전력에 의해 결정되어 전동기의 구동 속도 및 영전압 벡터 인가 시간에 따라 변화한다. 따라서, 제안하는 방법은 속도에 무관하게 측정 잡음에 민감하지 않으면서도 정격 용량을 초과하지 않는 단락전류의 크기를 기준으로 영전압 벡터 인가 시간을 결정하기 때문에 다양한 속도 범위에서 안정적인 구동 재개가 가능하다. 또한, 전동기의 파라미터 변동에 의한 영향을 추가적으로 분석하여 제안하는 방법의 타당성을 뒷받침한다. 본 논문의 타당성은 332kW급 영구자석 동기 전동기를 이용한 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

최근에는 철도 차량의 견인 전동기로 고효율의 장점을 가진 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)에 대한 연구가 급증하고 있다. IPMSM의 효율적인 벡터제어를 위해서는 회전자 위치가 필수로 요구되며 레졸버와 같은 위치 센서가 이용된다. 그러나 위치 센서의 사용은 시스템의 부피 및 비용을 증가시키기 때문에 센서리스 제어가 연구되고 있다. 일반적으로 센서리스 제어는 설계의 단순성과 높은 제어 신뢰성을 가진 확장역기전력(EEMF) 기반의 방법이 널리 이용되고 있다.^[1]

IPMSM이 고속에서 센서리스 제어로 구동되고 있을 때 인버터의 동작이 중단될 경우 다시 안정적으로 구동재개를 하기 위해서는 회전자의 초기 위치와 속도가 필요하다. 따라서 단락전류 벡터를 이용하여 회전자가 회전하는 중에도 초기 위치와 속도를 추정하는 방법의 구동재개 알고리즘이 연구되고 있다.^[2] 그러나 [2]에서는 다양한 속도 구간에 대한 구동재개 상황에 대해서는 분석이 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 구동 재개를 위한 초기 위치와 속도 추정 성능에 미치는 요인을 분석하고 전속도 영역에서 안정적인 철도 차량용 IPMSM의 구동 재개 알고리즘을 제안한다.

3. 구동 재개 방법

3.1 IPMSM의 회전자 초기 속도 추정

IPMSM이 회전하고 있을 때 인버터의 동작이 중단되는 상황이 발생할 경우, 영전압 벡터를 인가하여 흐르는 단락전류를 이용하여 회전자의 초기 위치와 속도를 추정할 수 있다. 영전압 벡터를 인가하게 될 경우, IPMSM의 동기 좌표계 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_d - \omega L_q & \\ \omega L_q & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^c \\ i_q^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 샘플링 주기가 고정자 권선의 시정수에 비해 매우 작다면 고정자 저항 R_s 는 0으로 근사화된다. 식 (1)를 이용하여 $d-q$ 축 전류를 라플라스 변환하면 다음과 같이 단락전류 벡터 I_{sc} 로 계산된다.

$$I_{sc} = \begin{bmatrix} i_d^c \\ i_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\phi_f}{L_d}(1 - \cos\omega T_s) \\ \frac{\phi_f}{L_q} \sin\omega T_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

초기 위치는 두 번의 영전압 벡터를 인가했을 때 두 I_{sc} 간의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 그림 1은 두 개의 영전압 벡터에 의한 I_{sc1} , I_{sc2} 와 3상 좌표계와 동기 좌표계의 관계를 보여준다. n 번째 영전압 벡터를 인가했을 때 정지 좌표계 d 축과 I_{scn} 가 이루는 각 θ_{scn} 은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_{scn} = \tan^{-1}\left(\frac{i_d^s}{i_q^s}\right) \quad (3)$$

첫 번째, 두 번째 영전압 벡터를 인가하여 얻은 θ_{sc1} 와 θ_{sc2} 의 차와 두 영전압 벡터 사이의 시간 간격 τ 를 이용하면 초기 속도는 다음과 같이 계산된다. 여기서, T_{sc} 는 영전압 벡터를 인가한 시간을 나타낸다.

$$\hat{\omega} = \frac{\theta_{sc2} - \theta_{sc1}}{T_{sc} + \tau} \quad (4)$$

3.2 IPMSM의 회전자 초기 위치 추정

그림 1의 (a)에서 동기 좌표계 d 축과 I_{sc1} 가 이루는 각 θ_0 는 식 (2)를 기반으로 다음과 같이 계산된다.

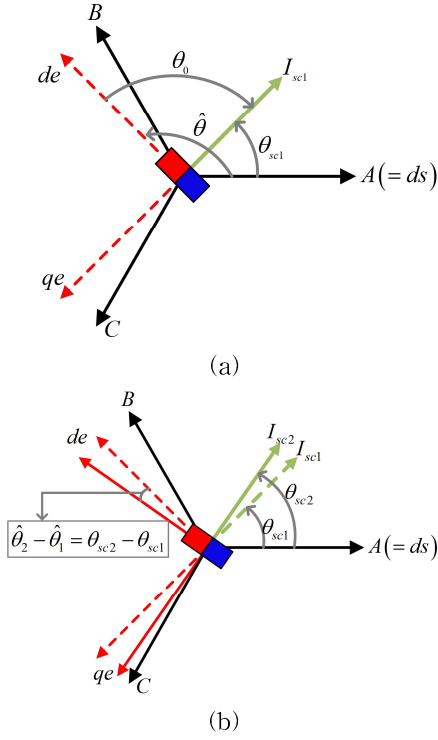


그림 1 단락전류 벡터와 3상 좌표계 및 동기 좌표계의 관계
Fig. 1 Relationship of short-circuit current vectors to 3-phase and synchronous reference frame

$$\theta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{i_d^c}{i_q^c}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{L_d \sin \omega T_s}{L_q (1 - \cos \omega T_s)}\right) \quad (5)$$

식 (3)을 이용하여 정지 좌표계 d축과 I_{sc2} 가 이루는 각 θ_{sc2} 을 계산하고, 식 (5)을 이용하면 다음과 같이 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \theta_{sc2} - \theta_0 \quad (9)$$

4. 제안하는 구동 재개 방법

4.1 전류 측정 오차

구동 재개 성능을 결정하는 요인은 크게 초기 속도 추정과 초기 위치 추정 관점에서 생각해 볼 수 있다. 먼저, 초기 속도 추정의 경우 3상 전류를 측정하는 과정이 필요하다. 초기 위치 추정의 경우에도 두 번째 단락 전류 벡터의 위치를 계산할 때 3상 전류 측정의 영향을 받는다. 따라서 다음의 식(6)과 같이 측정 잡음과 같은 이유로 전류 측정 오차가 발생할 경우, θ_{sc1} 와 θ_{sc2} 를 정확하게 계산하는 데 어려움이 있다.

$$\theta_{scn} = \tan^{-1}\left(\frac{i_d^s + \Delta i_{d, err}^s}{i_q^s + \Delta i_{q, err}^s}\right) \quad (6)$$

따라서 측정 잡음에 의한 영향을 줄이기 위해 I_{sc1} , I_{sc2} 의 크기를 크게 선정하여 측정 오차에 의한 영향을 감소할 수 있다. I_{sc1} , I_{sc2} 의 크기는 T_{sc} 이 결정된다. 그러나, T_{sc} 과 τ 의 시간은

I_{sc1} 와 I_{sc2} 사이에 회전자가 180° 이상 회전하지 않도록 하는 조건에서 제한된다. 따라서 다음과 같이 회전자 최대 속도를 고려하여 선정되어야 한다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}(T_{sc} + \tau) &= \theta_{sc2} - \theta_{sc1} < \pi, \\ T_{sc} + \tau &< \frac{\pi}{\omega_{\max}} \end{aligned} \quad (7)$$

4.2 전동기 파라미터 변동

초기 위치는 식 (5)에서 볼 수 있듯이 고정된 파라미터를 이용하여 θ_0 를 계산하는 과정이 포함된다. 따라서, 모터의 파라미터 변동에 의한 영향에 대한 분석이 추가적으로 이루어져야 한다. 초기 위치를 계산하는데 사용되는 파라미터는 $d-q$ 축 인덕턴스이며 이는 주로 전류 크기에 의해 변동하는 값이다. 그러나, 속도에 따라 역기전력의 크기가 달라지기 때문에 T_{sc} 을 전 속도 구간에서 동일하게 설정할 경우 I_{sc} 의 크기가 달라지게 되어 파라미터 변동 및 과전류에 의한 구동 안정성을 저하하는 문제를 야기한다. 따라서, 다양한 속도 구간에서도 파라미터 변동에 영향을 받지 않으면서도 안정적인 구동 재개 알고리즘이 필요하다.

4.3 제안하는 구동 재개 알고리즘

앞선 절에서는 구동 재개 성능에 영향을 미치는 요인에 대한 분석을 진행하였다. 크게 전류 측정 오차와 전동기 파라미터 변동에 의한 영향으로 나누어서 분석하였다. 본 논문에서는 전류 측정 오차에 강인한 구동 재개 알고리즘을 구축하기 위해 실험을 통한 Trial & Error 방식을 이용하여 측정 잡음에 강인한 I_{sc} 의 크기를 선정하고 그 크기를 기준으로 T_{sc} 이 결정되도록 알고리즘을 구성한다. 이때 T_{sc} 은 식 (7)에 의해 제한된다. 또한 동일한 전류 크기의 유지함으로 $d-q$ 축 인덕턴스의 변동에 대한 영향을 줄일 수 있다.

5. 시뮬레이션

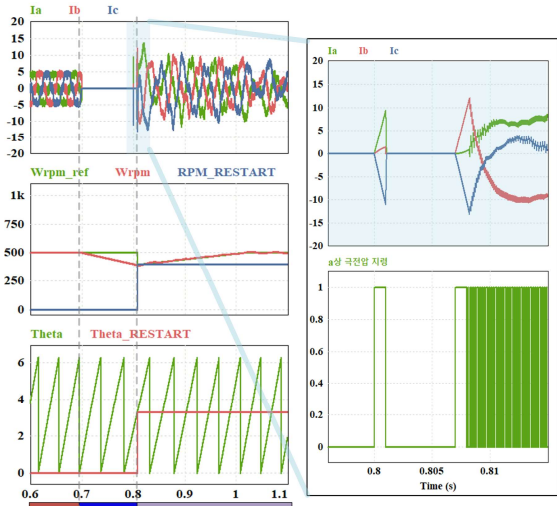
철도 차량용 IPMSM 기반 구동 재개 센서리스 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 표 1의 파라미터를 이용하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다.

표 1 PSIM 시뮬레이션에서 사용한 IPMSM 파라미터
Table 1 IPMSM parameters used in PSIM simulation

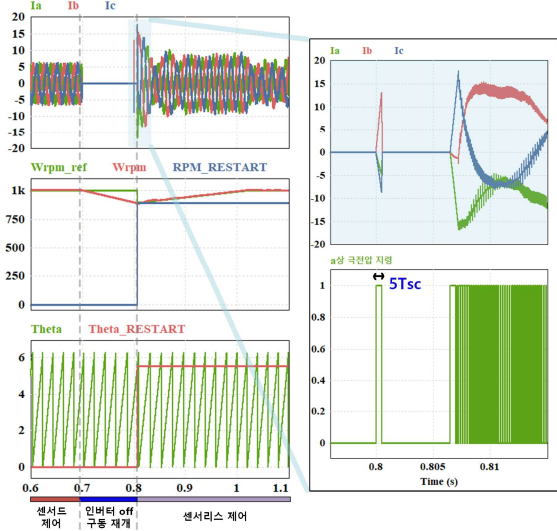
| | | | |
|-----------------|----------|-------|----------------------|
| DC Link Voltage | 1500 [V] | R_s | 39.224 [m Ω] |
| Rated Power | 337 [kW] | L_d | 1.833 [mH] |
| Rated Current | 350 [A] | L_q | 5.335 [mH] |
| ϕ_f | 0.5 | Pole | 6 |

5.1 속도별 구동 재개 성능 검증

그림 2는 일정 속도 구간에서 구동 재개 시뮬레이션 과정을 보여준다. 센서드 제어로 동작하고 있다가 인버터의 동작이 중단되고 단락 전류 벡터의 크기가 10[A]가 되도록 하는 두 개의 영전압 벡터를 인가하여 구동 재개를 위한 초기 속도와 위치를 추정한다. 추정 후에는 [1]에서 사용된 확장 역기전력 모델을 기반으로 하는 역기전력 관측 기반 센서리스 제어로 동작하게 된다. 그림 2의 (a)는 전동기를 500[rpm]으로 제어하고 있을 때



(a)



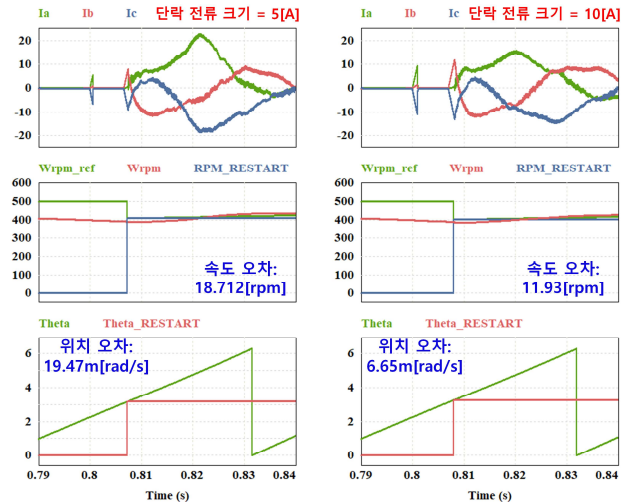
(b)

그림 2 동일 크기 단락전류 벡터를 이용한 구동 재개 시뮬레이션
Fig. 2 Simulation of restarting operation with equal-sized short-circuit current vectors

를 보여주며 그림 2의 (b)는 1000[rpm]으로 제어하고 있을 때 시뮬레이션 파형이다. 속도와 무관하게 I_{sc} 의 크기가 10[A]로 흐르기 위한 영전압 벡터가 (a)에서는 $10T_{sc}$ 초 동안, (b)에서는 $10T_{sc}$ 초가 인가됨을 알 수 있다.

5.2 전류 측정 오차에 따른 추정 성능 검증

그림 3은 전류 측정 오차에 대한 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션이다. 첫 번째 영전압 벡터가 인가됐을 때 흐르는 a상 단락전류에 0.5[A]의 측정 잡음을 모의했을 때 결과를 보여준다. 그림 3의 (a)는 I_{sc} 의 크기를 5[A]로 선정했을 때 속도와 위치 추정 결과이며 그림 3의 (b)는 I_{sc} 의 크기를 10[A]로 선정했을 때 속도와 위치 추정 결과이다. 속도 추정에 있어서는 그림 3의 (b)가 약 11.93[rpm]의 속도 오차를 가지고 있으며 그림 3의 (a)에 비해 속도 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 위치 추정에 있어서는 그림 3의 (b)가 약 6.65m[rad/s]의 위치 오차를 가지고 있으며 그림 3의 (a)에 비해 위치 오차가 감소



(a)

(b)

그림 3 단락전류 벡터에 따른 전류 측정 오차에 대한 추정 성능 비교 시뮬레이션

Fig. 3 Simulation results comparing the estimated performance of the current measurement error with the short-circuit current vector

하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동일한 전류 측정 잡음에 대하여 더 큰 I_{sc} 를 선정하는 것이 추정 성능을 높일 수 있다.

6. 결론

본 논문은 철도 차량용 IPMSM의 전속도 영역 센서리스 제어를 위한 구동 재개 알고리즘을 제안한다. 전류 측정 잡음과 단락전류 벡터 크기와의 관계를 분석하고 속도에 무관하게 동일한 크기의 단락전류 벡터를 기준으로 영전압 벡터를 인가한다. 제안하는 방법은 단락전류 벡터의 크기가 동일함으로 파라미터 변동에 대한 영향을 줄이고 고속에서 과전류에 의한 영향을 저감하여 구동 재개 안정성을 확보한다. 본 논문의 타당성은 332kW급 영구자석 동기 전동기를 이용한 시뮬레이션을 통해 검증했다.

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. P0017120, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," in IEEE Trans Ind Appl, Vol. 38, No. 4, pp. 1054-1061, 2004, July-Aug.
- [2] S. Taniguchi, S. Mochiduki, T. Yamakawa, S. Wakao, K. Kondo and T. Yoneyama, "Starting Procedure of Rotational Sensorless PMSM in the Rotating Condition," in IEEE Trans Ind Appl, Vol. 45, No. 1, pp. 194-202, 2009, Jan.-feb.